

Určenie parametrov vertikálnej gravimetrickej základnice Gánovce – Lomnický štít

Ing. Adam Novák, PhD.,
Geodetický a kartografický ústav
Bratislava

Abstrakt

V roku 2016 sa Geodetický a kartografický ústav Bratislava rozhodol na základe koncepčného zámeru na roky 2016–2020 vybudovať novú gravimetrickú základnicu medzi absolútnymi bodmi štátnej gravimetrickej siete Bardejov (Stará Ľubovňa) a Lomnický štít, ktorej súčasťou je vertikálna aj gravimetrická základnica Gánovce–Lomnický štít. Hlavným predpokladom bolo splnenie odporúčania výrobcu gravimetrov na minimálny rozsah 100 mGal (pozn. 1 Gal = 10^{-2} ms^{-2}) a rozsahom základnice pokryť čo najväčšie spektrum hodnôt tiažového zrýchlenia merateľného na území Slovenskej republiky. Od roku 2016 prebiehali na bodoch základnice merania s použitím absolútnych gravimetrov FG5X a relatívnych gravimetrov Scintrex CG5 a ZLS Burris. Spracovaním meraní boli odhadnuté parametre základnice v podobe hodnôt tiažového zrýchlenia na jednotlivých bodoch umožňujúce vykonávať spoľahlivú kalibráciu relatívnych gravimetrov.

Establishing a Gravity Calibration Line between Gánovce and Lomnický štít: Measurements and Data Processing

Abstract

Based on a conceptual plan for the years 2016–2020, the Geodetic and Cartographic Institute Bratislava decided to establish a new gravimetric base between the absolute points of the national gravimetric network Bardejov (Stará Ľubovňa) and Lomnický štít. This base includes both the vertical and gravimetric bases Gánovce - Lomnický štít. The main prerequisite was to meet the manufacturer's recommendation for gravimeters regarding a minimum range of 100 mGal (note: 1 Gal = 10^{-2} m/s^2) and to cover the largest possible range of gravitational acceleration values measurable within the territory of the Slovak Republic. Since 2016, measurements have been conducted at the base points using absolute gravimeters FG5X and relative gravimeters Scintrex CG5 and ZLS Burris. The processing of these measurements has provided estimates of the base parameters in the form of gravitational acceleration values at individual points, enabling the reliable calibration of relative gravimeters.

Keywords: gravimetry, least square adjustment, ballistic gravimeter

1. Úvod

Pri meraní s relatívnymi gravimetrami sú rozdiely tiažového zrýchlenia určované v interných jednotkách prístroja. Moderné gravimetre disponujú systémom automatického odčítania, založenom na systéme spätnej odozvy [1]. Pri zmene tiažového zrýchlenia dochádza k vychýleniu pozorovaneho telesa z rovnovážnej polohy a úlohou systému spätnej odozvy je pomocou dodania napätia vrátiť senzor naspäť do rovnovážnej polohy. Zmeny tiažového zrýchlenia sú teda priamo úmerné zmenám napätia dodaného do systému, ktoré je možné veľmi presne odmerať [2]. Proces stanovenia vzťahu medzi internými jednotkami relatívneho gravimetra a jednotkami tiažového zrýchlenia sa nazýva kalibrácia alebo aj určenie mierkového faktora relatívnych gravimetrov. Starnutím relatívnych gravimetrov a vplyvom pôsobenia vonkajších faktorov dochádza časom k zmenám mierkového faktora relatívnych gravimetrov [1], preto je dôležité kalibráciu vykonávať pravidelne. Kalibrácia relatívnych gravimetrov sa vykonáva na gravimetrických základniciach, reprezentovaných bodmi so známymi hodnotami skutočného tiažového zrýchlenia. Gravimetrické základnice tvoria dôležitú súčasť realizácie gravimetrických referenčných systémov štátu, keďže priamo ovplyvňujú rozmer siete.

Na Slovensku bolo v minulosti vybudovaných niekoľko, prevažne výškových gravimetrických základníc. Jednou z nich bola aj gravimetrická základnica nachádzajúca sa medzi Tatranskou Lomnicou a Lomnickým štítom tvorená

šiestimi bodmi. Základnica bola udržiavaná v priebehu realizácií gravimetrických systémov 1957 a 1964, no postupne došlo k poškodeniu jej bodov a časom zanikla. Po roku 2000 sa na území Slovenska nachádzala jediná oficiálna gravimetrická základnica medzi bodmi Hurbanovo a Modra, ktorej celkový merateľný rozsah tiažového zrýchlenia bol 34 mGal (pozn. 1 Gal = 10^{-2} ms^{-2}) [3]. Okrem oficiálnej základnice sa na území Slovenska nachádzali ešte 3 body vyššie spomenutej staršej gravimetrickej základnice medzi Tatranskou Lomnicou a Lomnickým štítom.

Absencia dostatočnej gravimetrickej základnice na území Slovenska vyústila v roku 2015 do rozhodnutia Geodetického a kartografického ústavu Bratislava, vybudovať novú oficiálnu gravimetrickú základnicu na vykonávanie kalibrácie relatívnych gravimetrov s dostatočným rozsahom, umožňujúcu celoročnú kalibráciu. Hlavným predpokladom bolo splnenie odporúčania výrobcu gravimetrov na minimálny rozsah 100 mGal [4] a rozsahom základnice pokryť čo najväčšie spektrum hodnôt tiažového zrýchlenia merateľného na území SR. Uvedená správa poskytuje informácie o metódach použitých pri meraní a opisuje postup spracovania meraných údajov s cieľom určiť hodnotu tiažového zrýchlenia bodov základnice v jednotlivých epochách merania. Súčasťou spracovania je aj analýza premenlivých zložiek pozorovaných v meraniach na bodoch základnice v čase. Vyrovnaním sú určené parametre základnice vo forme hodnôt tiažového zrýchlenia jednotlivých bodov základnice vrátane ich excentrov a stredných chýb.

2. Modernizácia gravimetrickej základnice

Návrh novej gravimetrickej základnice pozostával z celkového počtu deviatich bodov nachádzajúcich sa medzi Bardejovom a Lomnickým štítom. Súčasťou gravimetrickej základnice bola podľa návrhu z roku 2015 vertikálna gravimetrická základnica nachádzajúca sa medzi bodmi Gánovce a Lomnický štít. Tvoria ju 5 základných bodov: Gánovce (SK-401), Stará Lesná (SK-420), Štart (SK-418), Skalnaté pleso (SK-412) a Lomnický štít (SK-419) podľa obr. 1. Body tvoriace základnicu sú vybudované vo vnútorných priestoroch objektov (stanica lanovky, budova hydrometeorologického ústavu a pod.) z dôvodu zabezpečenia podmienok pre merania s balistickými gravimetrami typu FG5X. Umiestnené sú vždy na najspodnejšom podlaží budovy na betónovom pilieri odizolovanom od zvyšku budovy s plochou približne 1,3 m x 1,3 m a hĺbkou od 80 cm do 170 cm v závislosti od podlažia v danej lokalite.

Z rôznych dôvodov nemusí mať užívateľ gravimetrickej základnice umožnený prístup do objektov k bodom základnice, preto boli v blízkosti každého z hlavných bodov vybudované a zamerané ich excentre, ktoré sú voľne prístupné. Výhodou tejto konfigurácie je celkový merateľný rozsah tiažového zrýchlenia až 440 mGal a malé vzdialenosti medzi jednotlivými bodmi, ktoré urýchľujú proces kalibrácie.

2.1 Meracie práce

Na jednotlivých bodoch základnice boli od roku 2016 podľa obr. 2 priebežne vykonané gravimetrické merania s absolútnymi balistickými gravimetrami FG5X #251 a #248, a relatívnymi gravimetrami ZLS Burris B-20 a Scintrex CG5. Na každom bode boli vykonané absolútne merania v minimálnom rozsahu 10 hodín. Jednotlivé pády boli rozdelené do sérií, pričom každá séria obsahovala 100 pádov. Zvolený časový odstup začiatkov sérií bol 30 minút a časový odstup pádov bol 10 sekúnd. Každý gravimeter bol počas merania centrován nad značkou bodu základnice so zaznamenaním výšky jednotlivých nastaviteľných častí. Údaje o postavení absolútného gravimetra pri meraniach v rokoch 2016 a 2017 boli zaznamenané v technických správach z merania [5] a [6].

Relatívne merania boli vykonané za účelom odhadu lokálnych parametrov tiažového poľa vo forme gradientu tiažového zrýchlenia. Ten plní pri spracovaní významnú úlohu, nakoľko sa používa na redukciu odhadnutých hodnôt na značku bodu a pri vyrovaní absolútnych meraní. Merania vertikálneho gradientu prebiehajú v rôznych výškach nad bodom, pričom ich cieľom je zachytiť zmeny tiažového poľa na malých úsekoch charakteristických pre danú malú lokalitu. V roku 2016 bol gradient určený z meraní prístrojom ZLS Burris B-20 v piatich rôznych výškových úrovniach. Nasledujúce roky bol podľa harmonogramu (pozri obr. 2) použitý relatívny gravimeter Scintrex CG5 v štyroch výškových úrovniach. Excentrické body základnice boli pripojené pomocou opakovaných meraní relatívnymi gravimetrami Scintrex CG5 a LCR G-1011.

2.2 Spracovanie meraní balistických gravimetrov

V procese spracovania sú odhadnuté hodnoty tiažového zrýchlenia opravené o časovo premenlivé zložky, ktoré dosahujú hodnoty od jednotiek po stovky μGal , teda vý-

znamne prispievajú k určeniu hodnoty tiažového zrýchlenia. Aby bolo možné získať hodnotu tiažového zrýchlenia vzťahujúcu sa k polohe začiatku voľného pádu redukovanú o časovo premenlivé zložky [7], bolo nutné k odhadnutej hodnote zrýchlenia voľného pádu pripočítať korekcie z:

- zemských a oceánskych slapov,
- atmosférického tlaku,
- pohybu pólu,
- gravitačného účinku častí prístroja,
- individuálnej systematickej chyby absolútného gravimetra.

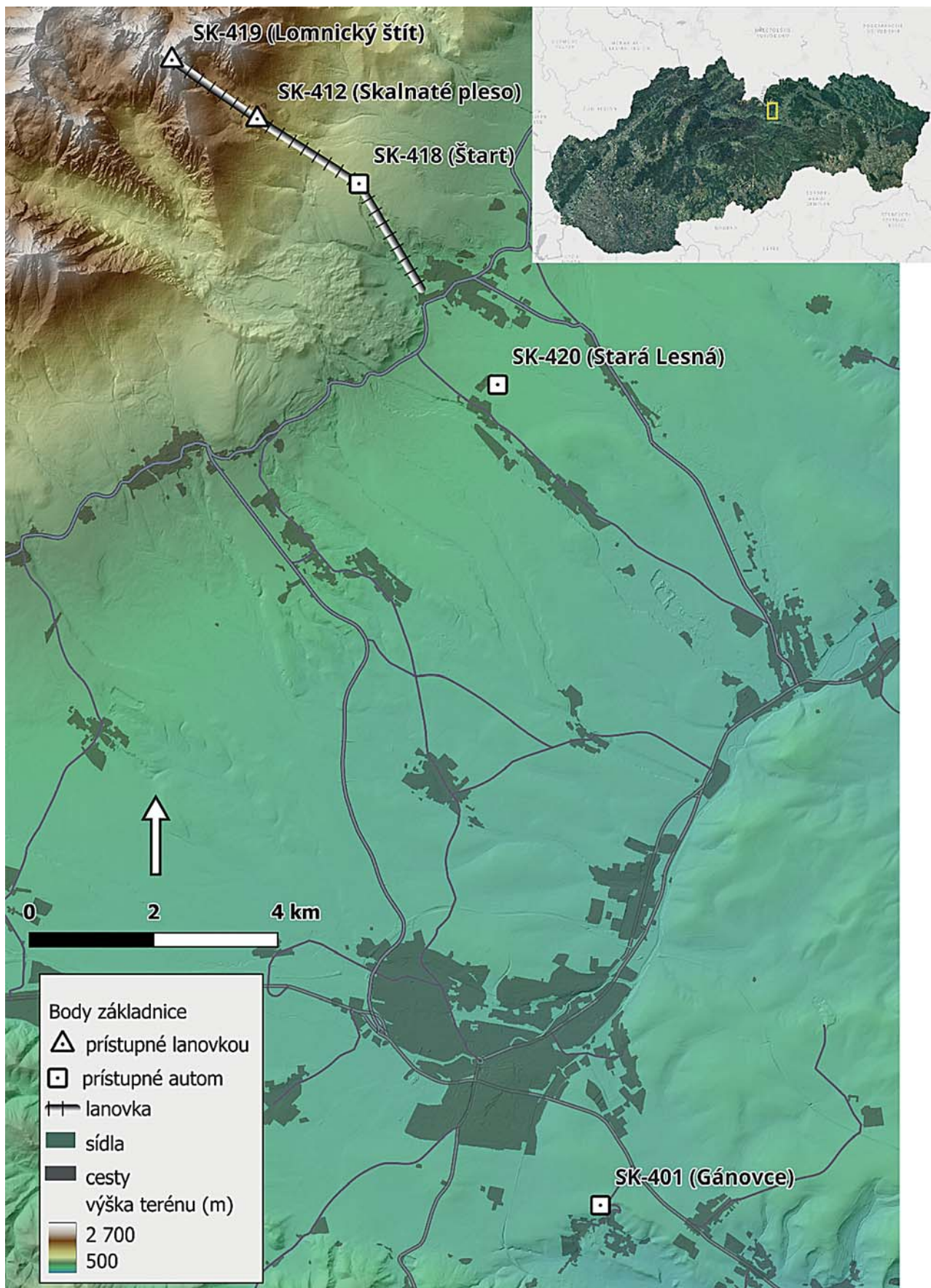
Uvedené korekcie sa aplikujú pri výpočte hodnoty tiažového zrýchlenia pre každý individuálny pád. V prípade individuálnej systematickej chyby prístroja a gravitačného účinku častí prístroja postačuje korekciu aplikovať na priemernú hodnotu všetkých pádov. Výsledná hodnota tiažového zrýchlenia sa následne získa ako vážený priemer hodnôt tiažového zrýchlenia získaných pre jednotlivé pády. Korekciu z gravitačného účinku častí prístroja je možné uvážiť pri spracovaní merania v softvéri g9 za predpokladu, že poznáme celkový gravitačný účinok častí prístroja vo vertikálnom smere na padajúci hranol. Pre prístroj FG5X bol gravitačný účinok prístroja δg_{SA} stanovený [8] na $-1,169 \mu\text{Gal}$.

Individuálna systematická odchýlka prístroja vychádza z konštrukčných štandardov a určuje sa porovnaním s inými absolútnymi gravimetrami na tzv. medzinárodných porovnávacích meraniach gravimetrov. Použitý gravimeter FG5X #251 a #248 sa zúčastnili celosvetového porovnania absolútnych gravimetrov CCM.G-K2.2017 [9] a regionálneho porovnania EURAMET.M.G-K3 [10], kde bola určená vzájomná nadväznosť oboch použitých gravimetrov v podobe miery ekvivalencie $-1,15 \mu\text{Gal}$ so štandardnou odchýlkou $0,48 \mu\text{Gal}$. Pre gravimeter FG5X #247 bola miera ekvivalencie stanovená na úrovni $-1,28 \mu\text{Gal}$ so štandardnou odchýlkou $0,70 \mu\text{Gal}$. V závislosti od skúseností operátora absolútného gravimetra je možné v procese spracovania uvážiť aj ďalšie korekcie ako napr. difrakcia laserového lúča, ktoré však nie sú štandardne implementované v používanom firemnom softvéri g9.

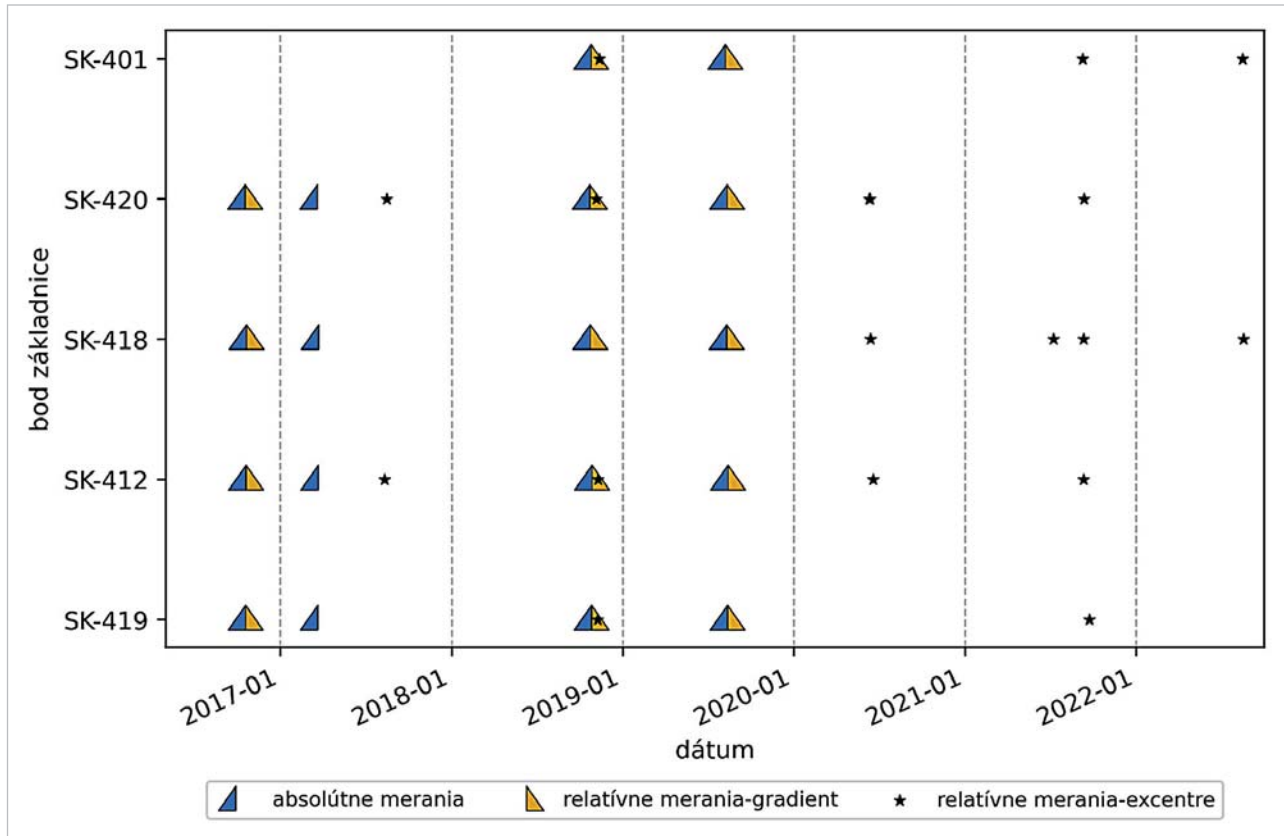
2.3 Redukcia meraných hodnôt do úrovne značky

Aby bolo možné s nameranými hodnotami tiažového zrýchlenia ďalej pracovať, musí najprv dôjsť k ich redukcii na referenčnú výškovú úroveň, ktorá je najčastejšie reprezentovaná vrchnou plôškou značky bodu, alebo zvolenou porovnávacou výškou [7]. Pre redukciu tiažového zrýchlenia do ľubovoľnej výšky je potrebné poznať aktuálnu hodnotu vertikálneho gradientu tiažového zrýchlenia W_{zz} . V normálnom poli uvažujeme pre vertikálny gradient hodnotu -0.3086 mGal/m [11], ktorá však nezodpovedá situácii, keď je hmota v okolí gravimetra rozložená vo všetkých smeroch, ako je to v tomto prípade. Z tohto dôvodu musíme vo výpočte pracovať s hodnotou, ktorá sa vzťahuje na konkrétnu lokalitu a je určená z meraní relatívnych gravimetrov.

Počas spracovania absolútnych meraní je zároveň možné zvoliť postup, ktorý minimalizuje vplyv použitého gradientu a chybu, ktorá tým vzniká. Meraná hodnota je v rámci spracovania vzťahovaná k tzv. efektívnej výške gravimetra h_{eff} , ktorá sa nachádza zhruba v jednej tretine pádu testovacieho telesa. Detailný popis efektívnej výšky spolu s postupom jej určenia sa nachádza v literatúre [12]. Pre ďalší výpočet budeme preto uvažovať hodnoty tiažového zrých-



Obr. 1 Znáznornenie bodov vertikálnej gravimetrickej základnice Gánovce – Lomnický štít na podklade digitálneho modelu terénu (DMR); zdroj údajov DMR: Úrad geodézie kartografie a katastra SR



Obr. 2 Harmonogram meraní a použitých prístrojov na bodoch základnice v rokoch 2016–2022

lenia vztiahnutú ku efektívnej výške g_{ef} , a jej prislúchajúcu strednú chybu σ_{gef} stanovenú na $2 \mu\text{Gal}$.

2.3.1 Spracovanie relatívnych gravimetrických meraní

Relatívne gravimetrické merania z rokov 2018 a 2019 boli spracované metódou najmenších štvorcov so súčasným uvážením chodu gravimetra. Metodika uvedená v ďalších podkapitolách je zapracovaná do nástroja vyvinutého v prostredí MATLAB (<https://mathworks.com>) a zároveň v jazyku Python za účelom automatizovaného spracovania. Nástroj je voľne dostupný na adrese <https://github.com/adnovak/gradmap>. V prípade gradientu tiažového zrýchlenia boli aplikované dve metódy spracovania, pričom jedna z nich umožňuje odhad nelineárnej zložky zmeny tiažového zrýchlenia. Nižšie uvedené vzťahy sú konzistentné s použitou metodikou pracovníkov VÚGTK (Výskumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v. v. i.) z roku 2016. Nakoľko originálne zápisníky z merania prístrojom ZLS Burris B-20 za rok 2016 neboli k dispozícii, odhadnuté parametre vertikálneho gradientu vzťahujúce sa k roku 2016 boli prebraté z technickej správy [5].

Prvý prístup výpočtu je založený na klasickom spracovaní denného úseku meraní, ktorý zodpovedá stepovej metóde. Pre jednotlivé výškové úrovne sa najprv odhadne rozdiel tiažového zrýchlenia oproti prvej výšковой úrovni. Základná observačná rovnica má v tomto prípade tvar:

$$g_{mer} = g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + a + b(t - t_1) + c(t - t_1)^2, \quad (1)$$

pričom g_{mer} je merané tiažové zrýchlenie opravené o interné aplikované korekcie (slapy, seizmický filter, náklon,

teplota a pod.) g_1 až g_4 sú hodnoty tiažového zrýchlenia v jednotlivých úrovniach. Parametre a až c sú koeficienty polynómu aproximujúceho chod gravimetra, t je čas prislúchajúci meraniu a t_1 je čas prvého merania. S cieľom regularizácie modelu sa z odhadu vynechá parameter g_1 , čím sa celé spracovanie vztiahne k prvej úrovni a dostaneme modifikovanú observačnú rovnicu (2):

$$g_{mer} = \Delta g_1 + \Delta g_2 + \Delta g_3 + a + b(t - t_1) + c(t - t_1)^2. \quad (2)$$

Celkovo tak odhadujeme tri parametre θ charakterizujúce zmeny tiažového zrýchlenia spôsobené presunom gravimetra ($\Delta g \dots$) medzi úrovňami a tri parametre chodu (a, b, c) zodpovedajúce kvadratickému aproximačnému polynómu:

$$\theta = \begin{bmatrix} \Delta g_1 \\ \Delta g_2 \\ \Delta g_3 \\ a \\ b \\ c \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Z odhadnutej zmeny tiažového zrýchlenia a výšky úrovni j a i určíme konštantný vertikálny gradient tiažového zrýchlenia použitím približného vzťahu (4) pričom pre výpočet strednej chyby využijeme zákon o šírení stredných chýb:

$$W_{zizj} \approx \frac{\Delta g_{ij}}{h_j - h_i}. \quad (4)$$

Zo štyroch výškových úrovní dokážeme zostaviť celko-vo šesť rozdielov tiažového zrýchlenia a identický počet hodnôt gradientu. Do ďalšieho spracovania sú jednotlivé hodnoty spriemerované a určí sa priemerná hodnota a jej prislúchajúca stredná chyba.

Druhý spôsob spracovania relatívnych meraní spočíva v odhade parametrov funkcie, ktorá aproximuje priebeh tiažového zrýchlenia s meniacou sa výškou. Do modelu je zároveň možné zahrnúť zmenu meraných relatívnych hodnôt tiažového zrýchlenia vplyvom chodu gravimetra. Merané hodnoty tiažového zrýchlenia môžeme vyjadriť pomocou vzťahu (5):

$$g_i = g_0 + \sum_{k=1}^2 p_k \cdot h^k + \sum_{l=1}^2 d_l \cdot (t_i - t_1)^l, \quad (5)$$

kde g_i je merané tiažové zrýchlenie odmerané v čase t_i , g_0 je absolútny člen, p_k je koeficient polynómu charakterizujúceho zmenu tiažového zrýchlenia s výškou h , d_l je koeficient polynómu l -tého stupňa aproximujúceho chod relatívneho gravimetra a t_1 je čas prvého merania. Použitím metódy najmenších štvorcov získame pomocou vzťahov 2. lineárneho modelu vyrovnané hodnoty parametrov charakterizujúcich zmenu tiažového zrýchlenia s výškou, parametre charakterizujúce chod gravimetra a ich prislúchajúce stredné chyby. Maximálny stupeň polynómu charakterizujúceho priebeh tiažového zrýchlenia bol zvolený na základe štatistickej významnosti odhadnutých koeficientov. Pri štatistickom testovaní parametrov bol použitý test parametrov 2. lineárneho modelu v Studentovom rozdelení pravdepodobnosti [13].

Redukcia z výšky nad bodom Δg_h sa v druhom variante určí z odhadnutých parametrov p_1, p_2 a stanovenej efektívnej výšky počas jednotlivých meraní vzťahom (6):

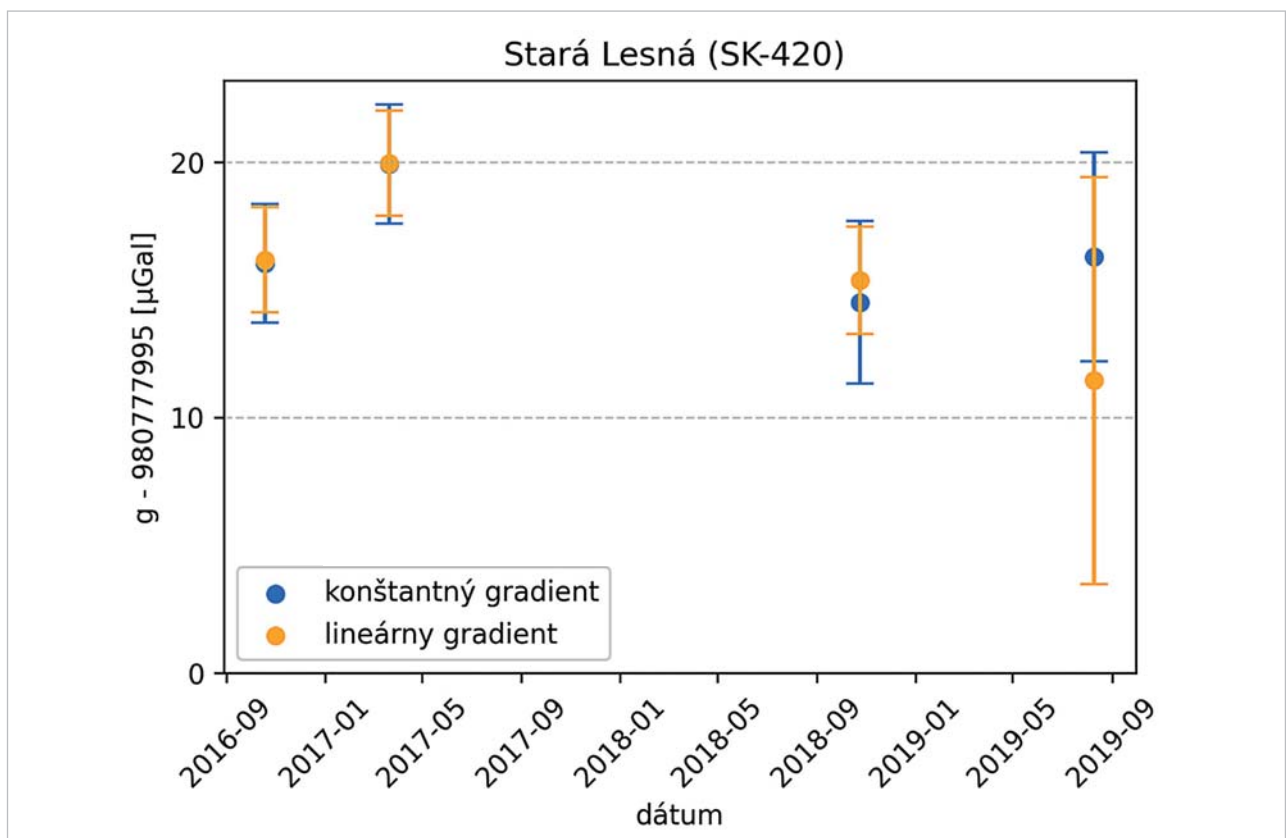
$$\Delta g_h = p_1 (h_{ef}) + p_2 (h_{ef}^2). \quad (6)$$

V prípade konštantného gradientu (prvá metóda) uvažujeme len konštantnú zložku gradientu W_{zz} , ktorá zodpovedá parametru p_1 , a teda lineárna závislosť tiažového zrýchlenia od zmeny výšky. Hodnotu na značke bodu v čase merania g a jej prislúchajúcu strednú chybu σ_g získame použitím redukcie podľa vzťahu (7) a vzťahu (8) vychádzajúceho zo zákona o šírení stredných chýb:

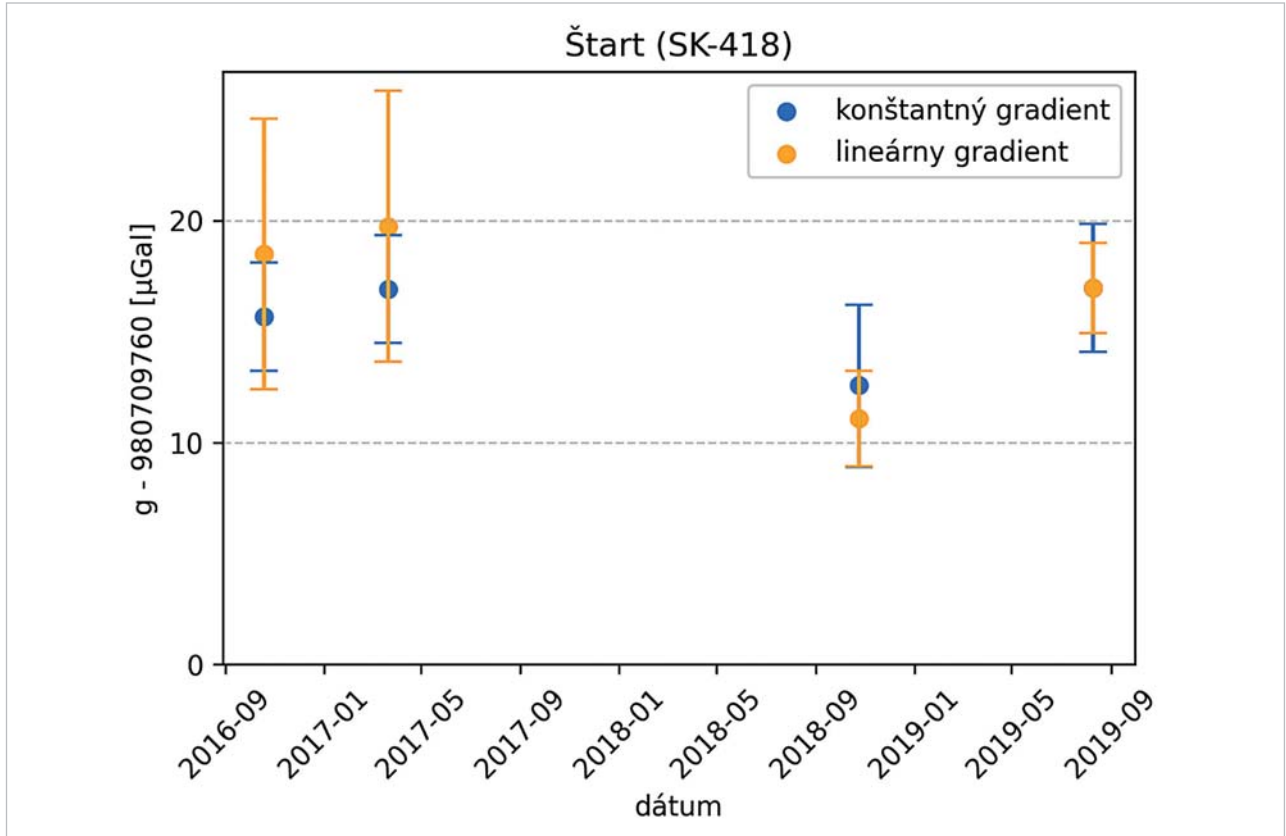
$$g = g_{ef} - \Delta g_h, \quad (7)$$

$$\sigma_g = \sqrt{\sigma_{gef}^2 + \sigma_{\Delta gh}^2}. \quad (8)$$

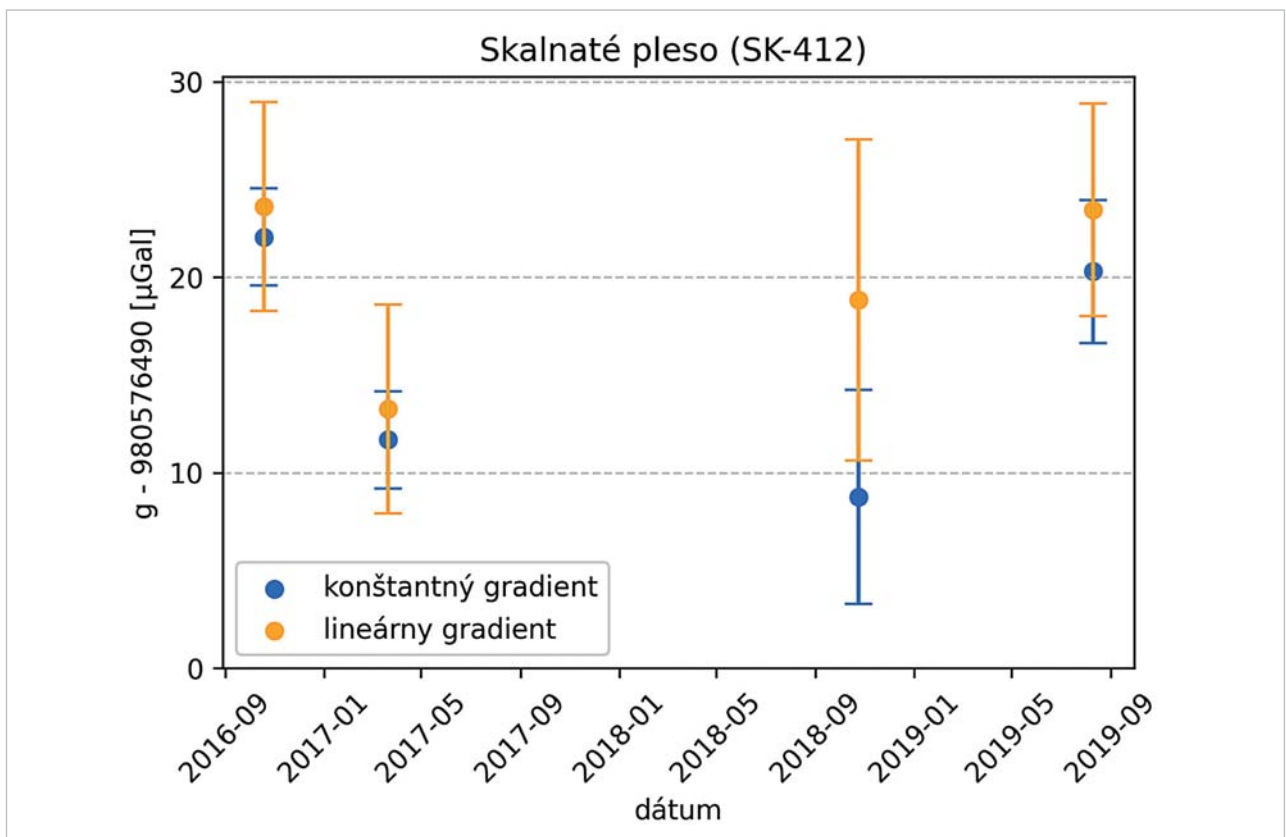
Vypočítané hodnoty tiažového zrýchlenia boli následne transformované do záväznej realizácie gravimetrického systému S-Gr95 tak, aby boli zachované známe hodnoty na bode SK-401 (Gánovce). Porovnaním odhadnutej hodnoty a záväznej hodnoty tiažového zrýchlenia z katalógu S-Gr95 bol určený rozdiel, ktorý bol pripočítaný ku všetkým odhadnutým hodnotám. Zobrazenie určeného tiažového zrýchlenia a jeho strednej chyby v jednotlivých epochách sa nachádza na obr. 1, 2, 3, 4, 5 a 6. Zobrazené sú hodnoty získané pomocou redukcie z výšky oboch variantov spolu s výslednými konfidenčnými intervalmi. Na bode SK-401 (Gánovce) boli vykonané len dve absolútne merania, preto nebol zahrnutý do analýzy časovo-premenlivých zložiek.



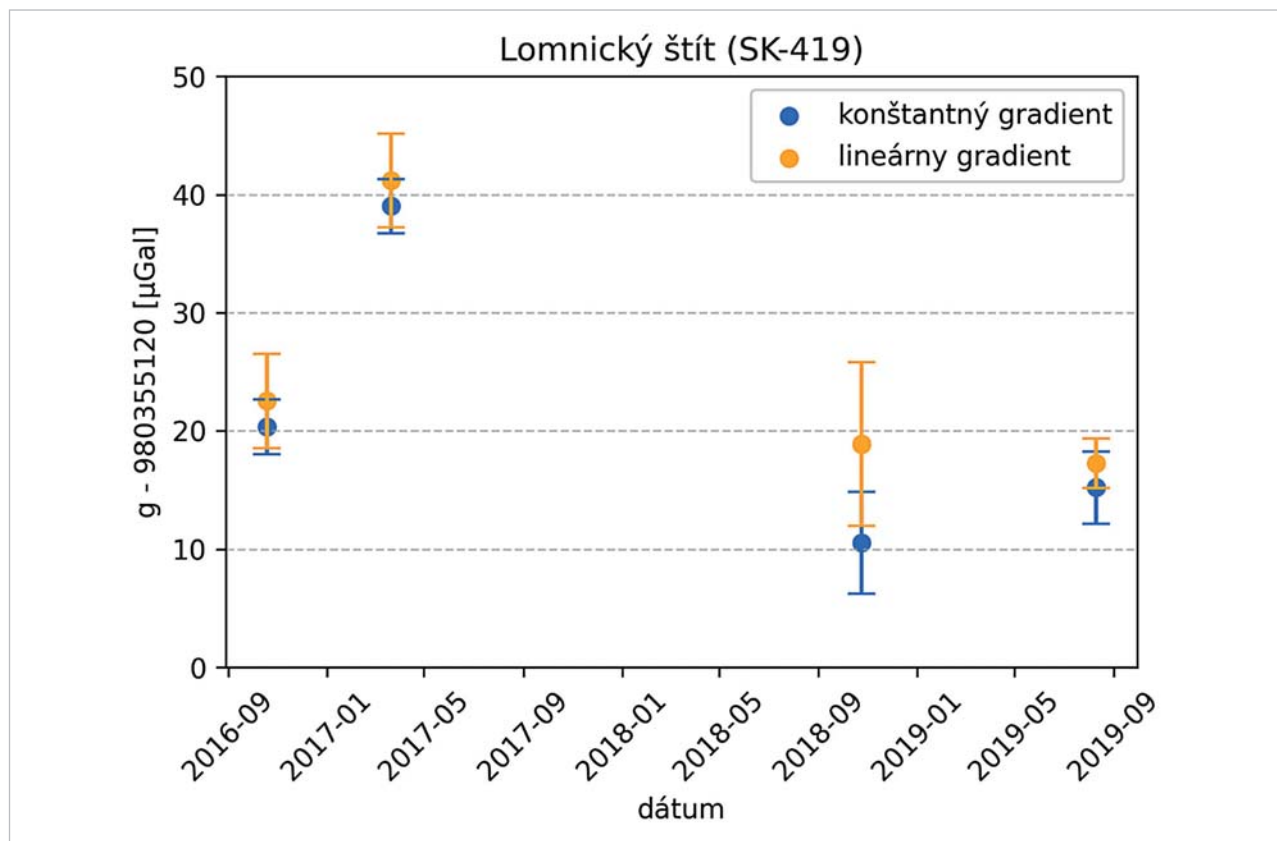
Obr. 3 Variácia tiažového zrýchlenia na značke bodu SK-420 pri použití rôznych hodnôt gradientu tiažového zrýchlenia



Obr. 4 Variácia tiažového zrýchlenia na značke bodu SK-418 pri použití rôznych hodnôt gradientu tiažového zrýchlenia



Obr. 5 Variácia tiažového zrýchlenia na značke bodu SK-412 pri použití rôznych hodnôt gradientu tiažového zrýchlenia



Obr. 6 Variácia tiažového zrýchlenia na značke bodu SK-419 pri použití rôznych hodnôt gradientu tiažového zrýchlenia

Obdobný postup spracovania bol aplikovaný na pripájacie merania excentrických bodov s tým rozdielom, že vo vzťahu (2) uvažujeme jediný parameter vzťahujúci sa na zmenu tiažového zrýchlenia Δg_1 . Výsledkom spracovania pripájacích meraní je rozdiel tiažového zrýchlenia medzi základným a excentrickým bodom a jeho prislúchajúca stredná chyba. Tie boli v poslednej fáze použité na určenie tiažového zrýchlenia excentrických bodov.

2.4 Vyrovnanie určených hodnôt a analýza časovo-premenlivých zložiek

Pri vykreslení časovej variácie hodnôt tiažového zrýchlenia na bodoch vypočítaných z meraní v rokoch (obr. 3, 4, 5 a 6) si môžeme všimnúť, že absolútna hodnota tiažového zrýchlenia určená v roku 2017 je na všetkých určovaných bodoch okrem bodu SK-412 (Skalnaté pleso) vyššia ako ostatné. Najvýraznejšie zmeny hodnoty tiažového zrýchlenia môžeme pozorovať na bode Lomnický štít, kde dosahuje hodnotu približne 20 μGal . Merania v roku 2017, ktoré značne vybočujú oproti iným, boli vykonané v čase, keď sa v okolí bodov nachádzala značná vrstva snehu a práve hydrologia predstavuje v gravimetrii jeden z najväčších zdrojov krátkodobých zmien.

S cieľom jednoznačne identifikovať pôvod zmien tiažového zrýchlenia v čase bola vykonaná analýza vplyvu hydrologických hmôt na jednotlivých stanoviskách. Celkový hydrologický vplyv bol rozdelený na globálnu a lokálnu zložku [14]. Pri globálnej zložke uvažujeme vodu obsiahnutú v zemi a v podobe snehu. Z dostupných hydrologických

modelov bol použitý model ERA5 európskeho programu Copernicus [15], [16]. Celý výpočet globálneho hydrologického efektu, ktorý aproximuje gravitačný účinok hydrologických hmôt vzdialených od stanoviska viac ako 10 km (približne $0,1^\circ$ sférickej vzdialenosti), prebieha v nástroji mGlobe [17]. Výpočet lokálnej hydrologickej korekcie, ktorá uvažuje hmoty vzdialené menej ako 10 km od stanoviska je komplikovanejšia z niekoľkých dôvodov. Pri hmotách nachádzajúcich sa v blízkosti stanoviska musíme uvažovať vhodnejšiu aproximáciu tvaru hydrologických hmôt, nakoľko tradičná rovnica uvažuje hmotný bod, a teda, že hmota je koncentrovaná do jedného zanedbateľne malého bodu. Vhodný aproximačný tvar pre hmoty nachádzajúce sa v bezprostrednej blízkosti bodov je mnohosten, ktorého gravitačný účinok odvodil Forsberg [18]. Analýza aproximačných tvarov zohľadňujúca presnosť a výpočtovú rýchlosť s narastajúcou vzdialenosťou je podrobne rozobratá autormi [19].

V blízkosti bodov základnice je prevažná časť hydrologických hmôt obsiahnutá v podpovrchovej vode a v podobe snehu. Na základe digitálneho modelu reliéfu DMR5.0 s metrovým rozlíšením bola určená sieť výpočtových bodov do vzdialenosti 10 km. Každému z bodov je na základe vzdialenosti od stanoviska priradená vhodná aproximácia podľa postupu limitných hodnôt stanovených v [19]. Pri snehovej pokrývke je predpoklad, že sa hmota nachádza nad terénom, preto boli modelové výšky z DMR5.0 opravené tak, aby sa výpočtové body nachádzali jeden meter nad terénom. Pri podpovrchovej vode boli výpočtové body situované jeden a dva metre pod terénom a následne bol určený ich priemer. Celkový gravitačný účinok

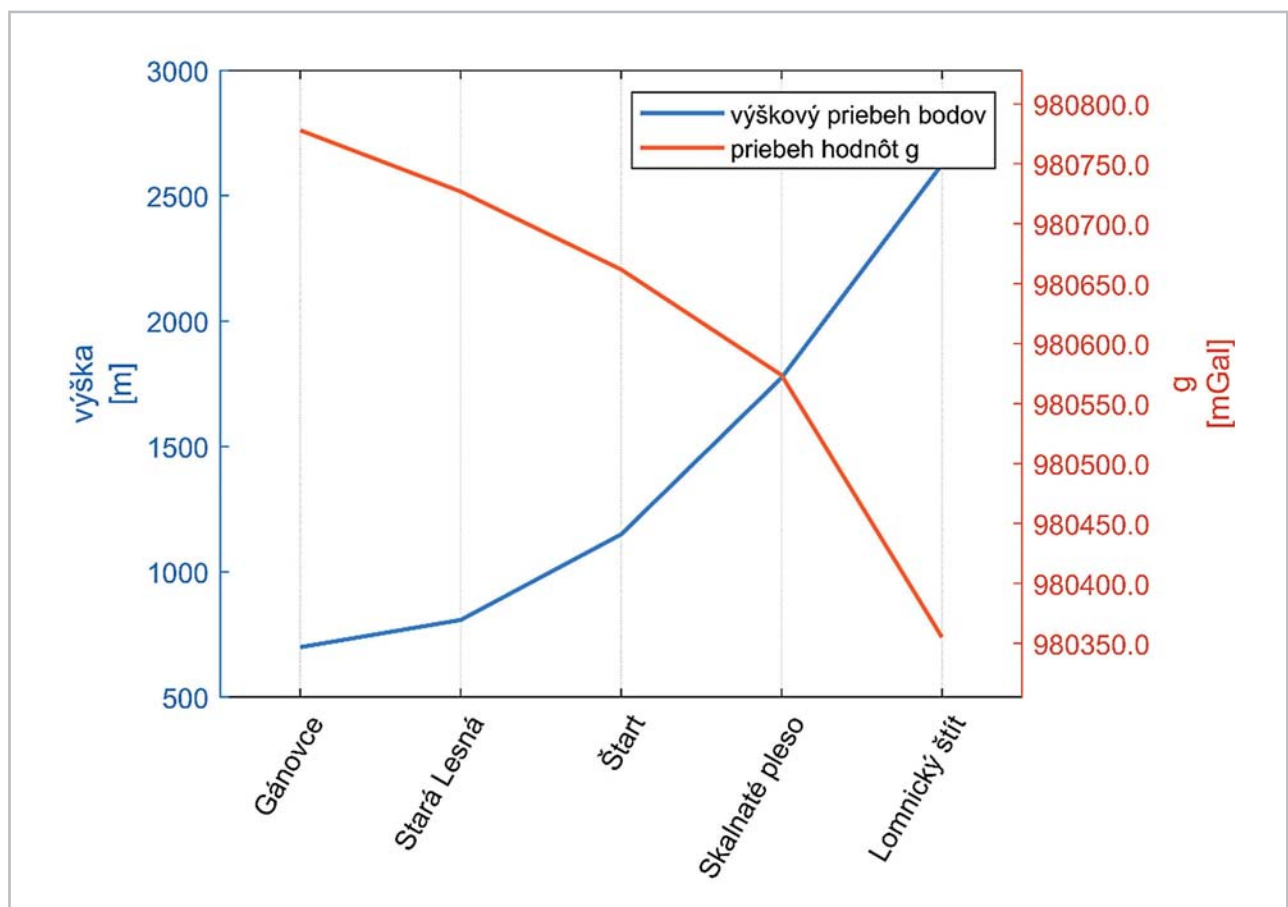
generovaný hmotami je potom určený ako súčet gravitačného účinku jednotlivých výpočtových bodov. Pri predpoklade rovnomerného rozloženia hmôt nadobúda topografický faktor konštantné hodnoty. Tento predpoklad má dve výhody, a to, že samotná topografia sa v čase mení len veľmi málo a zároveň fakt, že hydrologické veličiny, t. j. výška snehu alebo vlhkosť pôdy, dokážeme merať len bodovo. V **tab. 1** sú uvedené hodnoty faktoru topografie, ktoré vyjadrujú predpokladaný nárast alebo úbytok tiažového zrýchlenia na stanovisku generovaný hydrologickými hmotami o výške 1 m.

Tab. 1 Teoretický gravitačný účinok hydrologických zložiek o výške 1m pozorovaný na stanovisku a určený na základe digitálneho modelu reliéfu DMR5.0

číslo bodu	faktor topografie [$\mu\text{Gal}/\text{m}$]	
	podpovrchová voda	sneh
SK-420	2,7	2,1
SK-418	1,2	-0,8
SK-412	-6,1	-4,3
SK-419	83,0	61,0

Z tabuľky môžeme vidieť, že najväčšie hodnoty dosahuje faktor topografie na bode SK-419, kde priemerná výška snehu ekvivalentná 1 m vodných hmôt generuje tiažové zrýchlenie $61 \mu\text{Gal}$. Ostatné stanoviská sú hydrologiou ovplyvnené minimálne. To je možné vysvetliť skutočnosťou, že množstvo hmôt nachádzajúcich sa nad úrovňou stanoviska je v týchto prípadoch približne rovné množstvu nachádzajúcemu sa pod úrovňou stanoviska. Nakoľko vo vysokohorskom prostredí má pôda minimálnu schopnosť zadržať vodu, zamerali sme sa pri analýze hlavne na príspevok snehu. Výška snehu v danej lokalite bola získaná z hodinových modelov ERA5 s priestorovým rozlíšením $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Modelová výška snehu v čase merania bola v kombinácii s faktorom topografie použitá pri výpočte gravitačného účinku snehových hmôt a odpočítaná od tiažového zrýchlenia na značke bodu v jednotlivých časoch.

Z epochových meraní a im prislúchajúcich stredných chýb boli následne pomocou vyrovnania určené jednoznačné hodnoty tiažového zrýchlenia hlavných bodov základnice (pozri **obr. 7**). Odhad prebiehal aplikáciou metódy najmenších štvorcov – použitím vzťahov prvého lineárneho modelu. Prvý odhad bol vykonaný na originálnych epochových meraniach znázornených na **obr. 3, 4, 5 a 6**. Druhý odhad bol vykonaný po aplikácii korekcie z globálneho a lokálneho hydrologického efektu. Použitie hydrologických korekcií malo v tomto prípade minimálny vplyv na samotnú hodnotu tiažového zrýchlenia, kde nedošlo k zmene o viac ako $0,5 \mu\text{Gal}$. Avšak ako je uvedené v **tab. 2**, došlo k výraznej redukcii rozptylu hodnôt, čo sa prejavilo aj na strednej chybe odhadu.



Obr. 7 Znáznornenie priebehu výšok a priebehu tiažového zrýchlenia na bodoch základnice Gánovce – Lomnický štít

Tab. 2 Porovnanie stredných chýb odhadnutých hodnôt tiažového zrýchlenia

číslo bodu	stredná chyba odhadu	
	bez uváženia vplyvu hydrologie	s uvážením vplyvu hydrologie
SK-420	3,2	1,5
SK-418	2,9	2,5
SK-412	10,0	9,7
SK-419	17,9	9,6

3. Záver

Gravimetrické základnice tvoria dôležitú súčasť realizácie gravimetrického systému, nakoľko sa podieľajú na realizácii rozmeru gravimetrických základov. Absencia dostatočnej gravimetrickej základnice na území Slovenska vyústila v roku 2015 do rozhodnutia Geodetického a kartografického ústavu Bratislava, vybudovať novú oficiálnu gravimetrickú základnicu na vykonávanie kalibrácií relatívnych gravimetrov s dostatočným rozsahom. Súčasťou gravimetrickej základnice navrhutej medzi absolútnymi bodmi Bardejov a Lomnický štít bola podľa návrhu z roku 2015 vertikálna gravimetrická základnica Gánovce – Lomnický štít, a to pomocou moderných balistických gravimetrov. Parametre základnice boli určené na základe absolútnych gravimetrických meraní vykonaných v rokoch 2016, 2017, 2018 a 2019. Pri absolútnych meraniach boli použité absolútne gravimetre FG5X #251 a FG5X #247, ktoré boli prostredníctvom porovnania napojené na sieť svetových gravimetrov. Okrem absolútnych gravimetrických meraní boli na bodoch základnice vykonané aj relatívne gravimetrické merania zamerané na určenie vertikálneho gradientu tiažového zrýchlenia a za účelom určenia tiažového zrýchlenia na excentrických bodoch základnice. V rokoch 2016 a 2017 boli relatívne merania realizované s využitím relatívneho gravimetra ZLS Burris - B20 v piatich výškových úrovniach a v roku 2018 pomocou relatívneho gravimetra Scintrex CG5 v štyroch výškových úrovniach. Zápisníky z meraní boli spracované dvomi metódami. Prvá metóda uvažovala konštantnú hodnotu vertikálneho gradientu tiažového zrýchlenia. Druhá metóda odhad parametrov zmeny tiažového zrýchlenia s výškou, čím umožnila odhad nelineárnych parametrov.

Pri spracovaní absolútnych meraní v softvéri g9 bola pre získanie hodnôt tiažového zrýchlenia uvážená korekcia z celkového slapového účinku, korekcia z redistribúcie atmosférických hmôt, korekcia z pohybu pólu a korekcia z gravitačného účinku častí prístroja. Tiažové zrýchlenie bolo pomocou vertikálneho gradientu tiažového zrýchlenia, určeného z relatívnych gravimetrických meraní na stanovisku, prepočítané najprv do efektívnej výšky a následne na úroveň značky bodu použitím konštantných hodnôt gradientu tiažového zrýchlenia.

Nakoľko boli merania vykonané v rôznych podmienkach, niektoré body vykazujú v čase závislosť od hydrologických pomerov v okolí stanoviska. Pre všetky stanoviská bola vykonaná analýza vplyvu hydrologických parametrov

a určené korekcie zo snehu. Ich použitím je možné znížiť odhadované stredné chyby parametrov vo všetkých prípadoch. Avšak, súčasná rezolúcia IAG (International Association of Geodesy) zatiaľ nedefinuje podmienky a spôsob zavádzania hydrologickej korekcie v gravimetrických meraniach, preto boli nateraz z odhadu vynechané.

Použitím prvého lineárneho modelu boli metódou najmenších štvorcov určené vyrovnané hodnoty tiažového zrýchlenia na bodoch základnice zohľadňujúc všetky merania z rokov 2016 až 2019. Každý z bodov základnice bol zabezpečený značkou umiestnenou vo vonkajších priestoroch pre prípad neprístupnosti hlavného bodu tzv. excentrom. Excentre boli pripojené na množinu hlavných bodov základnice pomocou opakovaných meraní s relatívnym gravimetrom Scintrex CG5 spracovaných obdobne ako v prípade gradientu tiažového zrýchlenia.

Celkový rozsah merateľných hodnôt na bodoch základnice presahuje 440 mGal, pričom body prístupné autom poskytujú rozsah 85 mGal. Hodnoty tiažového zrýchlenia na bodoch základnice sú určené s presnosťou od 2 až 20 μ Gal. Dosiahnutá presnosť zohľadňuje presnosť použitých absolútnych gravimetrov, strednú chybu redukcie z výšky a vplyv okolitého prostredia počas merania.

Na záver bola určená nadväznosť odhadnutých hodnôt vzhľadom na záväzný gravimetrický referenčný systém S-Gr95 porovnaním so známou hodnotou na bode SK-401 (Gánovce). Zisteným rozdielom +12,7 μ Gal boli opravené všetky hodnoty tiažového zrýchlenia novourčených bodov, čím je zabezpečená nadväznosť bodov základnice na súčasne záväzný gravimetrický referenčný rámec.

LITERATÚRA:

- [1] TORGE, W.-MÜLLER, J.: Geodesy, 4th ed., 2012.
- [2] TORGE, W.: Gravimetry. 1989, Walter de Gruyter, Berlin. ISBN 3-11-010702-3.
- [3] DROŠČÁK, B.: História a Súčasný Stav Gravimetrických Základní Vybudovaných na Území SR, 2017.
- [4] Micro-g Lacoste Geoscientific Sensors. Micro-g LaCoste [online]. 27 March 2023.
- [5] PÁLINKÁŠ, V.-KOSTELECKÝ, J.-VALKO, M.: Protokol z měření, 2016.
- [6] PÁLINKÁŠ, V.-KOSTELECKÝ, J.-VALKO, M.: Protokol z měření, 2017.
- [7] TIMMEN, L.: Absolute and Relative Gravimetry: XU, G. (eds) Sciences of Geodesy 1, 2010, New York, Springer, ISBN 978-3-642-11741-1.
- [8] NIEBAUER, T. M.-BILLSON, R.-SCHIEL, A.-VAN WESTRUM, D.-KLOPPING, F.: The self-attraction correction for the FG5X absolute gravity meter. Metrologia. Online. 1 February 2013. Vol. 50, no. 1, p. 1–8. DOI 10.1088/0026-1394/50/1/1.
- [9] WU, Shuqing, et al.: The results of CCM.G-K2.2017 key comparison. Metrologia, Vol. 57, no. 1A, January 2020, p. 07002. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1088/0026-1394/57/1A/07002>.
- [10] FALK, R. et al.: Final report of EURAMET.M.G-K3 regional comparison of absolute gravimeters. Metrologia, Vol. 57, no. 1A, January 2020, p. 07019. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1088/0026-1394/57/1A/07019>.
- [11] TORGE, W.: Geodesy, 5th ed., De Gruyter Oldenbourg, 2023.
- [12] PÁLINKÁŠ, V.-JIANG, Z.-LIARD, J.: On the Effective Position of the Free-fall Solution and the Self-Attraction Effect of the FG5 Gravimeters, Metrologia 49, 2012.
- [13] DeGROOT, M. H.-SCHERVISH, M. J.: Probability and statistics. 4th ed., Addison-Wesley, 2012.
- [14] MIKOLAJ, M.-MEURERS, B.-MOJZEŠ, M.: The reduction of hydrology-induced gravity variations at sites with insufficient hydrological instrumentation. Studia Geophysica et Geodaetica. Online. July 2015. Vol. 59, no. 3, p. 424–437. DOI 10.1007/s11200-014-0232-8.
- [15] GELARO, R. et al.: The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). Journal of Climate. Online. July 2017. Vol. 30, no. 14, p. 5419–5454. DOI 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

- [16] COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE: ERA5-Land monthly averaged data from 2001 to present. Online. 2019. ECMWF. [Accessed 16 May 2023].
- [17] MIKOLAJ, M.-MEURERS, B.-GÜNTNER, A.: Modelling of global mass effects in hydrology, atmosphere and oceans on surface gravity. *Computers & Geosciences*. Online. August 2016. Vol. 93, p. 12–20. DOI 10.1016/j.cageo.2016.04.014.
- [18] FORSBERG, R.: Gravity field terrain effect computations by FFT. *Bull. Geodesique* 59, p. 342–360. DOI 10.1007/BF025210.
- [19] LEIRIAO, S.-HE, X.-CHRISTIANSEN, L.-ANDERSEN, O. B.-BAUER-GOTTWEIN, P.: Calculation of the temporal gravity variation from spatially variable water storage change in soils and aquifers. *Journal of Hydrology*. Online. February 2009. Vol. 365, no. 3–4, p. 302–309. DOI 10.1016/j.jhydrol.2008.11.040.

Do redakce došlo: 30. 8. 2024

Lektoroval:
doc. Ing. Jakub Kostecký, Ph.D.,
Výzkumný ústav geodetický,
topografický a kartografický, v. v. i.